

可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究

田 村 仁*・灘 岡 和 夫**

藻場が可撓性を有する底層抵抗体群であることに着目し、可撓性の有無が藻場キャノピー層とその周辺の流動構造にどのような影響を与えるかを、室内波動水槽に藻場模型を設置し、可視化実験と藻場周辺の乱流計測を行うことで明らかにすることを試みた。その結果、藻場キャノピーの存在により、波動場中の流動構造が大きく変化し、さらにその可撓性の有無によって、鉛直断面内で全く異なった流動構造となることがわかった。また、藻場とその周辺で大局的な鉛直循環流が形成されていることが確認された。

1. はじめに

沿岸域における藻場は沿岸生態系の基礎を担う重要な存在であるが、最近は深刻な状況に置かれており、磯焼け現象に代表される藻場の環境悪化が全国の様々な沿岸域で報告されている。このような状況に対して、藻場を保全し、また健全な状態に回復させて行くためには、藻場の生態環境を基本的に支配している外力条件や濁質・栄養塩輸送特性といった藻場周辺の物理・生態環境要因を定量的に評価していくことが不可欠となる。

藻場は、流体運動に対し単なるパッシブな存在ではなく、藻場の存在自体が周辺の流動・物質輸送特性に影響を与えている。藻場における基本的な水理特性に関する従来の研究は、「人工海藻による波浪・漂砂の制御」といった観点で行っているものが多く、浅野ら (1988, 1991)、間瀬ら (1989) の人工海藻による波高減衰効果に関する解析的研究、田中ら (1999) の海藻による乱流・流動構造の研究、辻本 (1992; 1995)、伊福ら (1994) の流動構造と漂砂輸送に関する実験と数値モデルに関する研究、などがある。

本研究では、藻場が可撓性を有する底層抵抗体群であることに着目し、可撓性の有無が藻場キャノピー層とその周辺の流動構造にどのような影響を与えるかを、室内波動水槽に藻場模型を設置し、可視化実験と藻場周辺の乱流計測を行うことで明らかにすることを試みた。

2. 実験装置及び実験方法

実験は、東京工業大学水工研究室の幅 40 cm、長さ 12 m の一次元造波水槽の水平床部 (長さ 6.4 m) を用い、水深 35 cm として行った。この水槽には、水平床部に続いて勾配 1/20 の一様斜面が設置しており、そこで入射波が碎波するようになっている。実験に用いた藻場模型の材質、大きさ、植生密度は、表-1 に示すとおりであり、これらを長さ 180 cm のアクリル板に千鳥格子状に取り付

け、造波水槽に設置した (図-1)。入射波条件は周期 1.5 秒、波高 5 cm とした。

可視化実験では、直径 1.5 mm の 3 本の真鍮管からそれぞれ色の異なる染料を、藻場キャノピー模型中央における境界位置とその上下 10 cm の位置に注入し、デジタルビデオカメラを用いて染料のラグランジュ的挙動について撮影を行った。

流動場に関しては 2 次元レーザー・ドップラー流速計 (日本カノマックス製) を用いて、波の進行方向及び鉛直方向の流速成分を測定した。測定時間、測定周波数はそれぞれ 150 秒間 (100 波)、50 Hz である。測定位置は、水平方向に関しては藻場模型中央 $x=0$ cm (座標軸に関しては図-1 に示すとおり) と $x=\pm 45$ cm, $x=\pm 95$ cm の鉛直断面に対し、水槽奥行き方向の中央で、キャノピー境界下 16 cm ($z=-16$ cm) からキャノピー境界上 8 cm ($z=8$ cm) まで 1 cm 間隔に設定した (ただし、可撓性模型の場合はキャノピー内での計測が不可能なため、キャノピー外でのみ測定を行った)。水位に関しては、容量式波高計 (KENEK 社製) を用いて $x=-140$ cm から 140 cm まで 20 cm 間隔で測定を行った。また、測定時間、測定周波数は流速測定と同様とした。

表-1 藻場模型条件

	材質	大きさ	植生密度
可撓性模型	黒色発泡ポリエチレン	5×1×200 mm	2 本/9 cm ²
非可撓性模型	アクリル	5×5×200 mm	2 本/25 cm ²

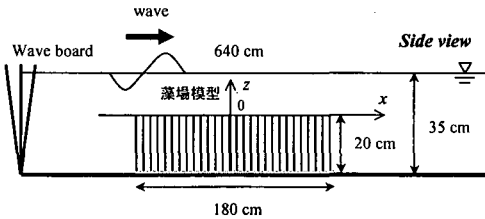


図-1 実験装置

* 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程
** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

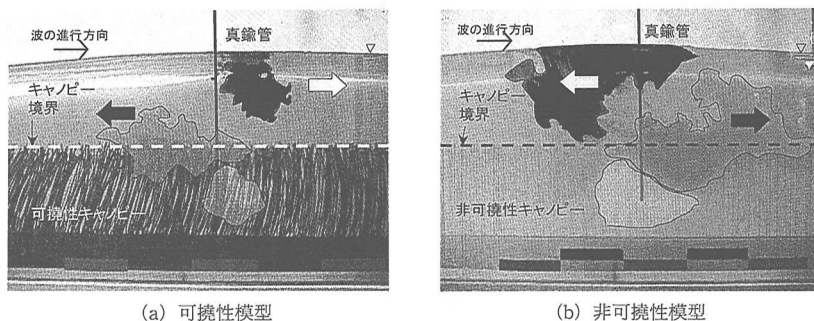


図-2 可視化実験結果

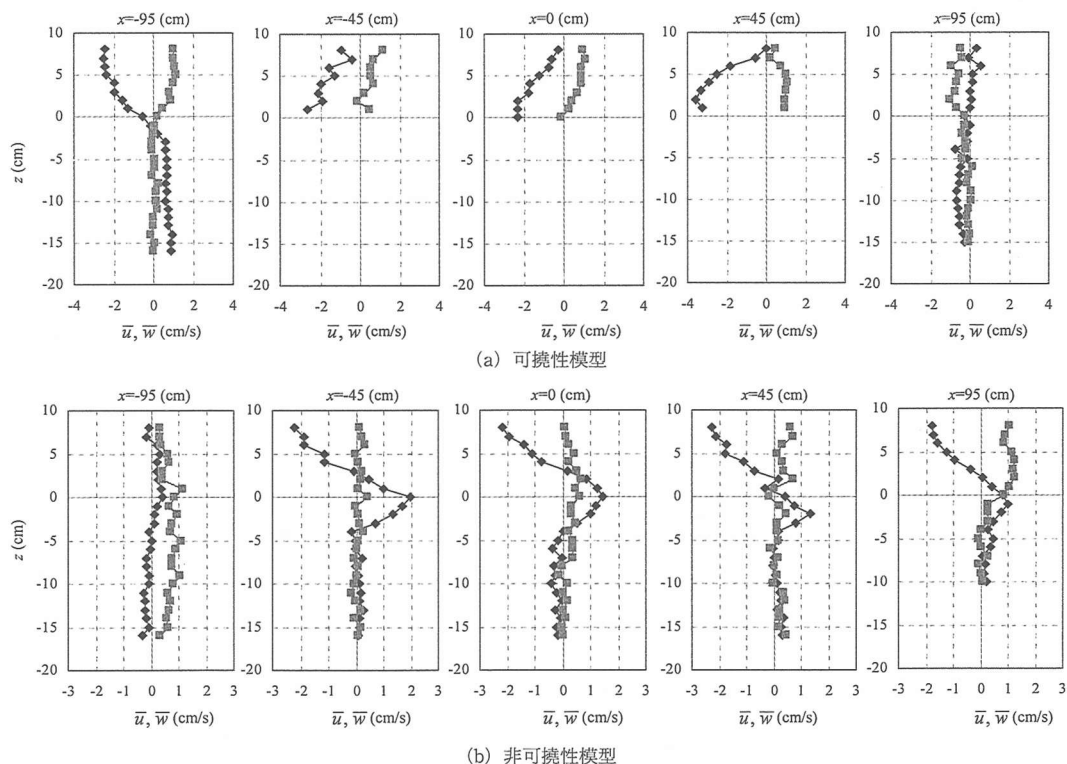


図-3 Euler 平均流速 (◆: 水平成分, ■: 鉛直成分)

3. 実験結果と考察

(1) 可視化実験による質量輸送パターンの把握

図-2 (a), (b) は可視化実験によって得られた染料注入後およそ 5 秒後のビデオ画像の一コマで、それぞれ可撓性キャノピー模型と非可撓性キャノピー模型に対する染料の輸送パターンを表している。これから、特にキャノピー境界からその上層の自由表面にかけての領域において、可撓性の違いにより、それらの質量輸送パターンが大きく異なっていることがわかる。すなわち、可撓性キャノピーの場合 (図-2 (a)) においては、キャノピー

境界付近で波の進行方向と逆向きの、また自由表面付近、藻場キャノピー内では波の進行方向の質量輸送が生じているのに対して、非可撓性キャノピーの場合 (図-2 (b)) には、キャノピー境界から自由表面付近にかけて質量輸送の向きが (a) と比べて全く逆になっている。

(2) キャノピー層周辺の Euler 平均流速

図-3 (a), (b) は、それぞれ、可撓性模型と非可撓性模型に対する水平・鉛直方向の Euler 平均流速を表している。これから、可視化実験による質量輸送パターンと同様に、Euler 平均水平流速分布が、藻場キャノピー模型の可撓性、非可撓性の違いによって、キャノピー境界

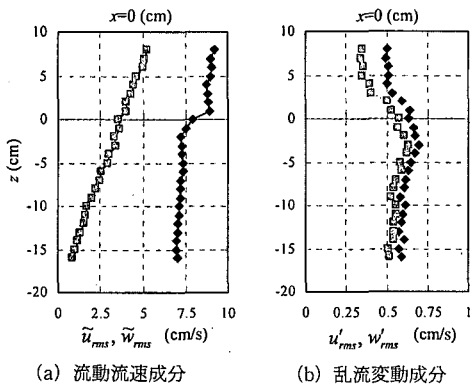


図-4 非可撓性キャノピーにおける波動・乱流流速成分
(◆：水平成分、■：鉛直成分)

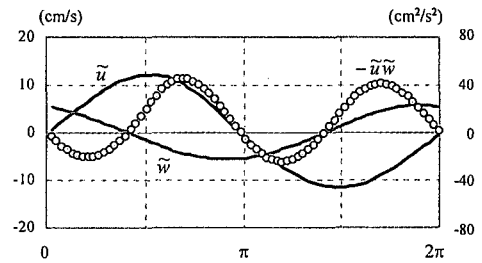
部付近で向きが互いに逆になっていることがわかる。

まず、可撓性キャノピーの場合 (図-3 (a))、実験結果より、キャノピー境界 ($z=0$ cm) から trough level ($z=12.5$ cm) 以下までの領域において、水平方向流速が波の進行方向と逆向きの流れとなっている。また、trough level 以上の領域では、Euler 平均水平流速は基本的に波の進行方向と同じとなる。さらにキャノピー側面部 ($x=\pm 95$ cm) における平均鉛直流速をみると $x=-95$ cm で上昇流、 $x=+95$ cm で下降流となっていることから、キャノピー層上の領域においては時計回りの循環流が形成されていることが考えられる。また、キャノピー上部における平均鉛直流速は正となっており、キャノピー層上で全体として上昇流が発生していることがわかる (このことは藻場領域での物質浮遊特性に関して重要な意味を持つ)。このことに対応して $x=\pm 95$ cm において、ともにキャノピー内に向う水平収束流が発生している。

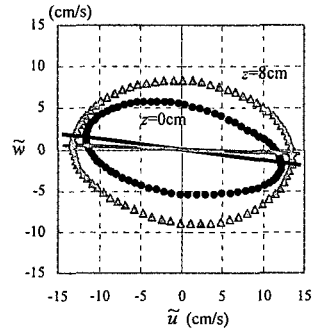
一方、非可撓性キャノピーの場合、キャノピー境界部では波の進行方向と同一方向の流れ、また、その上層で逆向きの流れ、 $x=+95$ cm で鉛直上向きの上昇流となっていることから反時計回りの鉛直循環流構造となっていることが考えられる。また、キャノピー内での顕著な鉛直上昇流は測定されなかったが、キャノピー側面部 ($x=-95$ cm, -15 cm $< z < 0$ cm) にかけては有意な大きさの上昇流が生じていることがわかる。

(3) キャノピー層周辺の波動流速成分と乱流成分

図-4 (a), (b) は、それぞれ、非可撓性モデルに対する波動流速成分 (r.m.s. 値) と乱れの変動速度成分 (r.m.s. 値) に関して、藻場キャノピー模型中央部 ($x=0$ cm) での鉛直分布を表している (可撓性に関してもほぼ同様の結果がキャノピー層上で得られている)。ここで、乱れによる変動速度成分は、LDV によって得られた流速データのスペクトル解析において Kolmogorov の $-5/3$ 乗則に従うエネルギースペクトルが 5 Hz 以上の周波数で見られた



(a) 各位相に対する波動流速成分と $-\tilde{u}\tilde{w}$



(b) 流動流速成分の平面分布

図-5 流動流速成分

ので、5 Hz 以上の周波数帯の変動速度成分を乱れ成分と定義した。波動流速による周期変動成分は実験で得られた流速データから平均値と乱れによる流速変動の差として求めた。

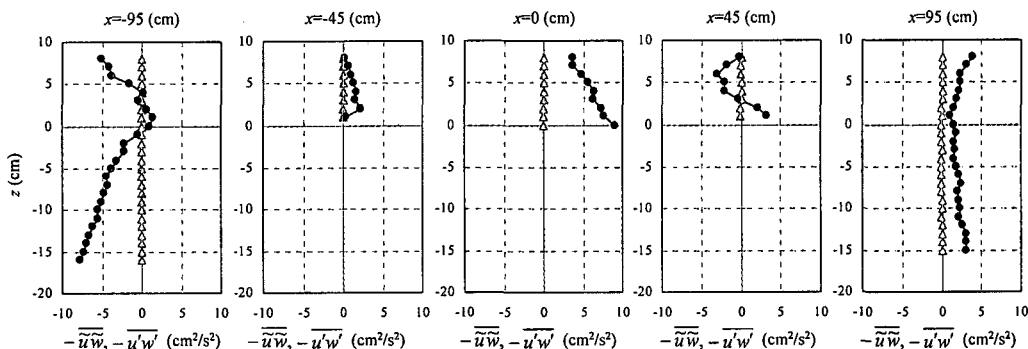
これらの図より、本実験においては波動流速成分が乱流変動成分に比べ 1 オーダー程度大きくなることがわかる。図-4 (a) に示されているように、非可撓性キャノピーの場合、キャノピー境界からキャノピー内では純粋な波動場と比べて水平流速成分レベルは減少するが、鉛直流速成分はほぼ通常の波動流速となる。それに対し図-4 (b) に示す乱流変動速度成分レベルは水平方向・鉛直方向ともにキャノピー内で大きくなっており、そのことから、非可撓性キャノピーの場合、水平方向の波動流速成分が藻場キャノピー内における乱れエネルギーの生成に大きく寄与していることがわかる。

(4) 波動場中の藻場キャノピー周辺における力学バランス

この様な藻場周辺の特徴的な流れの駆動力を考えるため、得られた流速データを平均流速成分、波動流速成分 (周期変動成分)、乱流変動速度成分に分解し、藻場周辺における流れの力学バランスに関して考察を行った。まず、上記のように流速成分を以下の様に分解して表す。

$$u = \bar{u} + \tilde{u} + u' \quad (1)$$

ここで、 u : 流速、 $\bar{u}$: 平均流速成分、 $\tilde{u}$: 波動流速成分、 u' : 乱流成分である。これを Navier-Stokes 方程式に代入し、時間平均を取ると、以下の水平方向流速に関する

図-6 可撓性キャノピーにおける $-\bar{u}w'$ (●), $-\bar{u}'w'$ (△) の空間分布

方程式が得られる (上付バーは一周期平均)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u}^2 + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{u}w + \frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{u}^2 + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{u}w + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{u}^2 + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{u}'w' = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \rho \nabla^2 \bar{u} + \bar{F}_x \quad (2)$$

ここで、 p は圧力、 ρ は水の密度、 F_x は藻場キャノピー層による植生抵抗項である。ここでは上式を以下の様に表す (Neilson, 1992)。

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial z} + \bar{F}_x = 0 \quad (3)$$

ただし、

$$\bar{\sigma} = -\bar{p} - \rho \bar{u}^2 - \rho \bar{u}'^2 - \rho \bar{u}^2 \quad (4)$$

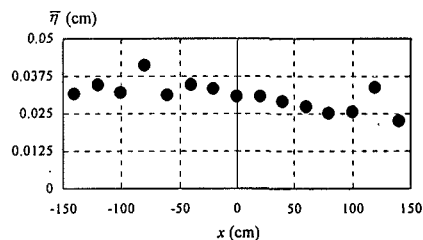
$$\bar{\tau} = \rho \nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \bar{u}w - \rho \bar{u}w' - \rho \bar{u}'w' \quad (5)$$

である。以下、式(4)、(5)によって表される波動場中における流れの駆動力に着目して考察を行う。

(5) 可撓性藻場キャノピー周辺における力学バランス

まず、可撓性藻場模型における力学バランスに関して検討を行う。式(5)より、波動場中の底層抵抗体群である藻場周辺においては、波動流速成分の相関項の空間勾配が流れの駆動力として考えられる。

図-5(a)、(b)は、波動流速成分相関項 $-\bar{u}w$ (図-6参照)が大きいキャノピー境界 ($x=0$ cm, $z=0$ cm) における、(a) 各位相に対する水平・鉛直波動流速成分と $-\bar{u}w$ 値、(b) 波動流速の水平・鉛直成分の平面プロットである $\bar{u}-\bar{w}$ 図、をそれぞれ示したものである。また、(b)では比較のため、自由表面付近 ($x=0$ cm, $z=8$ cm) における波動流速成分に関してもプロットしている。キャノピー層の無い通常の純粋な波動場においては、水平方向流速と鉛直方向流速は位相差が $\pi/2$ ずれているため、その積の一周期平均値は0となるはずである。しかし図-5(a)からわかるように、今の場合、 $\bar{u}$ と $\bar{w}$ の位相差は完全に $\pi/2$ とはなっておらず、その結果、1周期平均値 $-\bar{u}w$ が有意な値となることがわかる。このことに対

図-7 可撓性キャノピー周辺における平均水位 $\bar{\eta}$

応して、図-5(b)に示すように、波動流速変動の主軸の傾きが生じており、それによって正味の相関値が生成されていることがわかる。

図-6は、藻場周辺における波動流速成分と乱れの流速成分に関して、水平方向流速と鉛直方向流速の積の平均値 $-\bar{u}w$ 、 $-\bar{u}'w'$ の空間分布を表したものである。これを見ると、波動流速成分相関項 $-\bar{u}w$ は動 Reynolds 応力 $-\bar{u}'w'$ に比べ2オーダー以上大きな値となっており、前者が流れの駆動力として支配的要因となることがわかる。さらに、その鉛直勾配は負であるが、それはキャノピー境界付近における負の Euler 平均流速の生成に対応している。

一方、図-7は、藻場周辺の平均水位を表しているが、藻場模型の置かれている -90 cm $< x < 90$ cm においては波の進行方向に平均水位勾配が作用しており、このためキャノピー層内においては正の平均流速場となり、可視化実験において確認できた藻場中央部 ($x=0$ cm) における正の質量輸送が説明できるものと考えられる。

以上により、可撓性キャノピーの場合、キャノピー境界付近においては波動流速成分相関項 $-\bar{u}w$ の空間勾配による岸向きへの駆動力と、平均水位勾配に対応する圧力勾配がバランスしており、また、キャノピー内においては水平圧力勾配と植生抵抗が力学的につり合っているものと考えられる。

(6) 非可撓性藻場周辺における力学バランス

図-8は、非可撓性藻場模型周辺における $-\bar{u}w$ 、

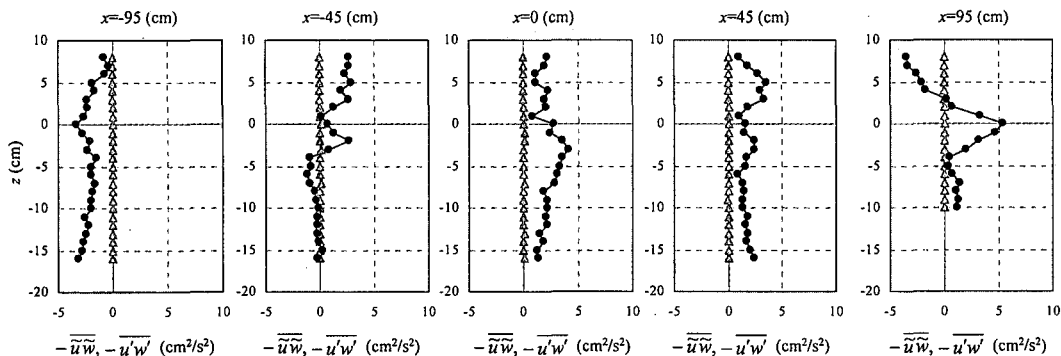


図-8 非可撓性キャノピーにおける $-\overline{u'w'}$ (●), $-\overline{u'w'}$ (△) の空間分布

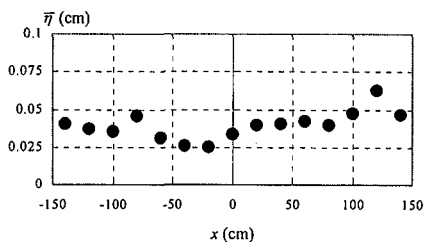


図-9 非可撓性キャノピー周辺における平均水位 $\bar{\eta}$

$-\overline{u'w'}$ の空間分布を表している。これを見ると、可撓性キャノピーと同様に、波動流速成分相関項 $-\overline{u'w'}$ は動 Reynolds 応力 $-\overline{u'w'}$ に比べて 1 オーダー以上大きな値となっているが、流れの駆動力となるその空間勾配はキャノピー境界付近で複雑な分布型となっており、平均水平流速の構造との対応が必ずしも明確ではない結果となった。

また、図-9 は、藻場キャノピー周辺の平均水位を表しているが、キャノピー左端 ($x = -80$ cm) からキャノピー中央付近 ($x = -40$ cm) までは set-down, キャノピー中央付近 ($x = -40$ cm) から右方 ($x = 120$ cm) にかけては set-up が起きており、また、可撓性キャノピーと比べその水位差は 2 倍程度となっていることから、非可撓性キャノピーの場合に関しては、平均水位勾配による力学的寄与が大きいものと考えられる。また、藻場キャノピー全体では、右方の set-up 量が大きいために、可撓性キャノピーの場合とは反対に、波の進行方向と逆向きの圧力勾配が働いている。キャノピー層上の領域の上部では水位勾配により波の進行方向と逆向きの流れが生じ、また、キャノピー境界では、波動流速成分相関項 $-\overline{u'w'}$ の空間勾配によるものと思われる正の流速が発生しているが、詳細に関しては今後検討が必要である。なお、これらの set-up・set-down はキャノピー側面境界における鉛直上昇流 (図-3 (b) 参照) による湧き出し効果によるもの

であると考えられる。

4. おわりに

藻場の基本的な水理特性を明らかにすることを目的とし、特に藻場植生の可撓性の有無の効果に着目した室内模型実験を行った。その結果、藻場キャノピーの存在により、波動場中の流動構造が大きく変化し、さらにその可撓性の有無によって、鉛直断面内で全く異なった流動構造となることがわかった。また、藻場とその周辺で大域的な鉛直循環流が形成されていることが確認された。

謝辞：室内実験での藻場模型製作や可視化実験において、東京工業大学大学院情報環境学専攻修士課程学生の葛西亮平君にご助力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎 (1988): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 138-142.
- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 揺動する海藻群落上を伝搬する波の特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 26-30.
- 伊福 誠・岩田充浩・米澤泰雄・坂田則彦 (1994): 人工海藻周辺の流れと漂砂, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 566-570.
- 間瀬 肇・古田幸也・酒井哲郎・浅野敏之・柳生忠彦 (1989): 傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 90-94.
- 田中厚至・長岡 裕・原 恒司 (1999): 往復流下における柔軟な植生周りの流れに関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 806-810.
- 辻本剛三 (1992): 藻場が存在する場における流れと浮遊砂濃度, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 276-280.
- 辻本剛三 (1995): 乱流モデルによる単純化された藻場上の流れと浮遊砂濃度特性について, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 451-455.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, World Scientific, 12 p.